

УДК 621.791.052:539.4

Д. М. Шахматов, М. В. Шахматов

ООО «ЦПС Сварка и Контроль»,

г. Челябинск

## КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ВНЕДРЕНИЯ ШАРОВОГО ИНДЕНТОРА

*В докладе приведена методика контроля остаточных сварочных напряжений на основе вдавливания в плоскую поверхность сварного соединения шарового индентора с последующей регистрацией напряженно-деформированного состояния методом голографической интерферометрии.*

*Ключевые слова: остаточные сварочные напряжения, шаровой индентор, голографическая интерферометрия.*

*D. M. Shakhmatov, M. V. Shakhmatov*

## RESIDUAL WELDING STRESSES CONTROL BY SPHERE INDENTOR PENETRATION

*The report describes the technique of the residual welding stresses control on the basis of the sphere indenter penetration into the flat surface of a welded joint succeeded by the stress-strain state registration by the hologram interferometry.*

*Keywords: residual welding stresses, sphere indenter, hologram interferometry.*

Основы данного метода заключаются в следующем. При силовом контакте жесткого шарового индентора с плоской поверхностью упругопластического тела появляется пластическая деформация, которая с ростом нагрузки распространяется как в глубину тела, образуя кольцевую вмятину, так и на поверхность, образуя выпучивание материала (рис. 1.). После снятия нагрузки происходит упругое восстановление с некоторым уменьшением глубины вмятины  $h$ , однако область выпучивания, которая формируется вокруг индентора и диаметр отпечатка на поверхности остаются практически неизменными и несут в себе информацию о первоначальном напряженном состоянии упругопластического тела.

Процесс упругопластического вдавливания шара описывается эмпирическим уравнением Мейера [1], устанавливающим связь между усилием вдавливания  $P$  и диаметром отпечатка  $d$ :

$$P = ad^n, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий физические свойства материала ( $E$  – модуль упругости,  $\sigma_T$  – предела текучести);  $n = 2-2,6$  – показатель степени, характеризующий сопротивление пластическому деформированию (склонность к упрочнению).

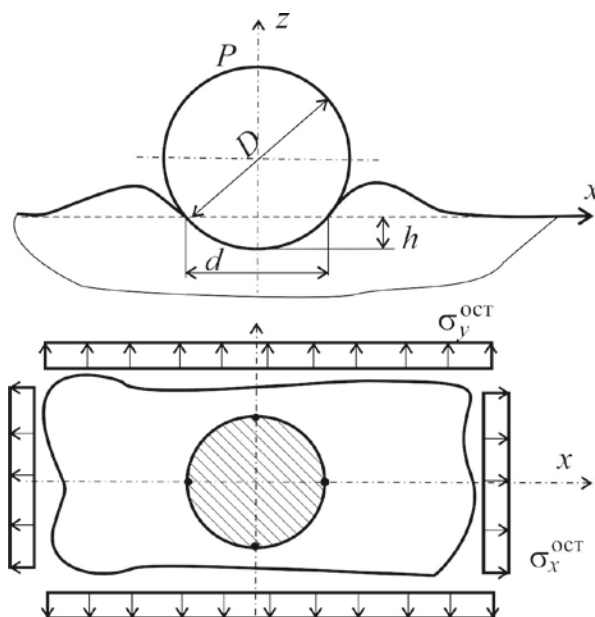


Рис. 1. Деформирование материала при вдавливании шарового индентора

Остаточные сварочные напряжения (ОСН) вызывают изменения в характере пластического деформирования при вдавливании индентора, которое отражается в формировании области выпучивания и самой формы рельефа после снятия нагрузки. В частности, при наличии в поверхностном слое объекта начального плоского напряженного состояния, интенсивность напряжений ( $\sigma_i$ ) в контактной задаче для точек контура отпечатка описывается следующим выражением [2]:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i(0)}^2 \pm (\sigma_i^{\text{ост}})^2 \pm 3\sigma_r(\sigma_x^{\text{ост}} - \sigma_y^{\text{ост}}), \quad (2)$$

где  $\sigma_{i(0)}$  – интенсивность напряжений в классической контактной задаче вдавливания индентора (без ОСН);  $\sigma_r$  – главные радиальные напряжения в

классической задаче;  $\sigma_i^{\text{ост}}$  – интенсивность ОСН;  $\sigma_x^{\text{ост}}$ ,  $\sigma_y^{\text{ост}}$  – главные ОСН, действующие вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Анализ выражения (2) показывает, что пластические деформации в различных точках контура отпечатка начинаются неодновременно. Интенсивность остаточных напряжений  $\sigma_i^{\text{ост}}$  определяет опережение или отставание появления пластических деформаций, а компонента  $3\sigma_r(\sigma_x^{\text{ост}} - \sigma_y^{\text{ост}})$  – описывает неравномерность деформирования по контуру площади контакта.

В контактной задаче наиболее информативной частью по влиянию ОСН, действующих в подповерхностных слоях материала являются нормальные к плоскости сварного соединения перемещения материала  $W$ , формирующие рельеф вокруг контура отпечатка. В качестве измерителя перемещений  $W$  был применен способ голографической интерферометрии, обладающий преимущественной чувствительностью к данным перемещениям. Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 2.

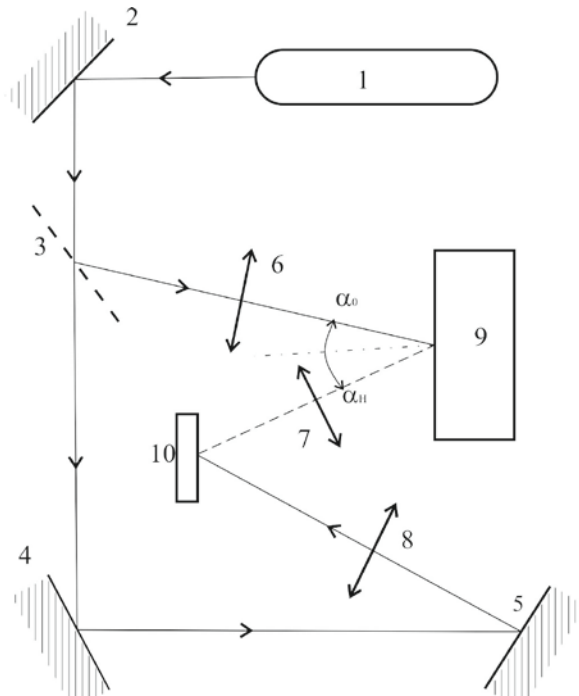


Рис. 2. Оптическая схема интерферометра: 1 – лазер; 2,4,5 – зеркала; 3 – делитель; 6,8 – микрообъективы; 7 – проецирующий объектив; 9 – сварное соединение; 10 – детектор

На первом этапе исследования способом двух экспозиций получают интерференционную картину вдавливания индентора в материал без ОСН с

целью получения начальных условий. Для этого достаточно небольшого темплета из основного металла. Данная интерференционная картина для ненапряженного материала представляет собой изолинии нормальных перемещений в виде симметричных концентрических окружностей вокруг образовавшегося отпечатка (рис. 3, а). В радиальном направлении перемещения  $W$  имеют явно выраженный максимум, который находится на расстоянии  $r_0$  от центра отпечатка. При изменении диаметра  $d$  отпечатка меняется и координата  $r_0$ , но относительная величина  $k = (r_0^2)/dr$  остается постоянной. Точки, лежащие на расстоянии  $r_0 = 0,5kd$ , принимали в качестве контрольных точек для каждого конкретного материала. Как правило величина  $r_0$  находится в пределах значений  $r_0 = (1,15 \dots 1,3) 0,5d$ . Наибольшее перемещение  $W_{od}$ , по интерференционной картине устанавливается по номеру интерференционной полосы  $N_{od}$ . Данная полоса связана с диаметром отпечатка уравнением, подобным уравнению Мейера [2]:

$$N_{od} = N_o(d/d_o)^2, \quad (3)$$

где  $d_o$  – условный начальный диаметр отпечатка,  $N_o$  – порядок полосы на контрольном радиусе  $r_0$  при создании отпечатка  $d_o$ .

После получения начальных условий (3) в ненапряженном материале приступают к определению ОСН в сварных соединениях. На основе двух экспозиций получают интерференционную картину нормальных перемещений (рис.3, б, в). При этом на первой экспозиции фиксируют на детектор (фотопластинку) начальную картину участка поверхности. Затем, в данном месте, создают отпечаток произвольного диаметра при неизменном положении сварного соединения и фиксируют на детектор картину перемещений от данного отпечатка. Далее по полученной картине определяют оси главных ОСН, которые совпадают с осями симметрии интерференционных полос. На расстоянии  $r_0$  получают данные об абсолютных значениях порядков полос  $N_{1,2}$  на главных осях в контрольных точках сварного соединения с учетом их знака и находят их разностные значения  $\Delta N_{1,2}$  по следующему выражению:

$$\Delta N_{1,2} = N_{1,2} - N_{od}. \quad (4)$$

Выражение для определения ОСН имеет следующий вид[2]:

$$\sigma_{1,2}^{\text{ост}} = \frac{2}{3} \sigma_T \ln \left( 1 - \frac{\Delta N_{1,2}}{2N_{od}} \right). \quad (5)$$

Необходимо отметить, что изменению растягивающих напряжений от 0 до  $\sigma_T$  соответствует уменьшение величины перемещений на перпендикулярной к действующему напряжению оси (рис. 3, б). Изменению сжимающих напряжений от 0 до  $\sigma_T$  соответствует увеличение величины максимальных перемещений на перпендикулярной к действующему напряжению оси (рис. 3, в).

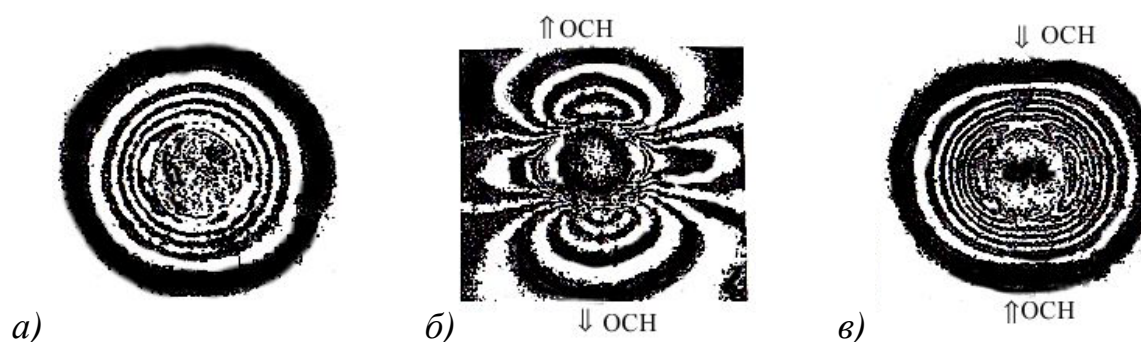


Рис. 3. Интерференционные полосы нормальных перемещений: а) без ОСН (начальные условия для материала); б) при растягивающих ОСН; в) при сжимающих ОСН

Данный метод позволяет получить объем информации о знаках, величине и направлению главных осей ОСН. Измерения проводятся с точностью (чувствительностью)  $0,05 - 0,15 \sigma_T$  материала сварного соединения. Силовое воздействие на объект приводит к появлению отпечатка индентора диаметром  $1 - 1,5$  мм, глубиной  $0,02 - 0,04$  мм с минимальным коэффициентом концентрации не более 1,1. На основании изложенного, предлагаемый метод можно квалифицировать как неразрушающий для определения ОСН.

#### *Список литературы*

1. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
2. Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Коваленко В. В. Технология изготовления и расчет сварных оболочек. – Уфа: Полиграфкомбинат, 1999. – 272 с.